ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 62-50 10.23947/1992-5980-2017-17-1-105-112

Структурный синтез дискретных адаптивных следящих систем на основе объединенного принципа максимума*

А. А. Костоглотов[1], С. В. Лазаренко[2], А. А. Кузнецов[3], И. В. Дерябкин[4], В. А. Лосев[5] **

[1, 2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[3] Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, г. Воронеж, Российская Федерация
[4] Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[5] Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал ДГТУ), г. Шахты, Российская Федерация

Structural synthesis of discrete adaptive tracking systems based on the combined maximum principle ***

A. A. Kostoglotov[1], S. V. Lazarenko[2], A. A. Kuznetsov[3], I. V. Deryabkin[4], V. A. Losev[5] **

[1, 2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[3] Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin, Voronezh, Russian Federation
[4] Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[5] Institute of Service and Business (DSTU branch), Shakhty, Russian Federation

Введение. Несоответствие структуры математической модели наблюдаемому процессу является одной из причин срыва сопровождения при функционировании управляемых систем. Это определяет актуальность задачи структурного синтеза следящих адаптивных систем, которая рассматривается в экстремальной постановке

Материалы и методы. Для решения задачи синтеза в квазидетерминированном приближении используется методология объединенного принципа максимума. Исследование в этом случае заключается в поиске условия минимума целевого функционала, который является результатом свертки критерия качества и интеграла действия. Это позволяет построить модель фильтра состояния со структурной адаптацией как решение обратной задачи динамики. Практическая реализация полученных с применением такого подхода результатов в цифровых следящих системах ставит задачу выбора схемы конечномерной аппроксимации полученной модели, что связано с определением вида приближения синтезирующей функции и использованием общего решения однородного дифференциального уравнения.

Результаты исследования. Рассмотрен вариант практической реализации цифровых следящих систем на базе конечномерной аппроксимации с новой структурой переходной матрицы и ковариационной матрицы вектора интенсивности возмущений в дискретном времени.

Обсуждения и заключение. Результаты математического моделирования показывают, что новый метод синтеза следящих систем в дискретном времени в условиях регулярных возмущений обеспечивает повышение точности функционирования алгоритмов оценки в сравнении с традиционными.

Ключевые слова: дискретное время, структурная адаптация, объединенный принцип максимума, синтез, фильтр Калмана.

Introduction. Discrepancy of the mathematical model structure to the observed process is one of the causes for loss in the control system operation. It determines the urgency of the problem of structural synthesis of the adaptive tracking systems which is considered in the extremum formulation.

Materials and Methods. The combined maximum principle methodology is used to solve the synthesis problem in the quasideterministic approximation. In this case, the minimum condition of the objective functional which is the result of the convolution of the quality criterion and action integral is investigated. This allows building a state filter model with the structural adaptation as a solution to the inverse dynamic problem. Practical implementation of the results received through this approach in the digital tracking systems sets a problem of selecting a finite-dimensional approximation scheme for the obtained model which is associated with the determination of the synthesizing function approximation form and the use of the general solution to the homogeneous differential equation.

Research Results. Embodiment of the digital tracking systems based on the finite-dimensional approximation with a new structure of the transfer matrix and covariance matrix of the disturbance intensity vector in discrete time is considered.

Discussion and Conclusions. The mathematical modeling results show that a new method of the tracking systems synthesis in discrete time under regular perturbances improves accuracy of the estimators operation compared with the traditional approaches.

Keywords: discrete time, structural adaptation, combined maximum principle, synthesis, Kalman filter.

* Работа выполнена по грантам РФФИ № 16-37-60034 мол_а_дк, № 16-38-00665 мол_а, № 15-08-03798 А и № 15-38-20835 мол_а_вед.
** E-mail: kostoglotov@me.com, rh3311@mail.ru, smithaa@yandex.ru, i.deryabkin@jint.biz, aibolit_773@mail.ru
*** The research is done on RFFI grants nos. 16-37-60034 mol_a_dk; 16-38-00665 mol_a; 15-08-03798 A; and 15-38-20835 mol_a_ved.

Введение. Наиболее общий подход к синтезу следящих систем связан с решением стохастического дифференциального уравнения Стратоновича. Его конечномерная аппроксимация приводит к сеточным фильтрам с большим объемом вычислительных затрат. Поэтому практическое применение получил ставший эталоном для сравнения фильтр Калмана. Структурно подобные алгоритмы, например, расширенный фильтр Калмана, регрессионные фильтры, сигма-точечные фильтры и т. д., применяют в связи с необходимостью оценки нелинейных систем в условиях воздействия негауссовских случайных процессов [1–4]. Эффективность таких решений не очень высока, поскольку они используют аппроксимацию, обоснованность применения которой не очевидна и сводится к эмпирическим предположениям. Применение метода расширения пространства состояний и построение модели наблюдаемого процесса на основе формирующего фильтра выглядит более обоснованно. Однако не всегда реальный нелинейный процесс можно аппроксимировать линейным фильтром с достаточной степенью точности. Это связано со структурными отличиями линейных и нелинейных моделей динамики, приводящими к возникновению ошибок в следящих системах, которые можно трактовать как «структурные» и рассматривать задачу адаптации структуры модели с целью их компенсации. При реализации фильтра Калмана эти ошибки частично компенсируются за счет возникновения корреляционных связей, которые определяются решением уравнения для ковариационной матрицы ошибок фильтрации (оценки). Однако в установившемся режиме коэффициенты обратной связи подобных алгоритмов практически перестают зависеть от наблюдений и, соответственно, «структурные» ошибки полностью не компенсируются. На практике используются менее точные, но более эффективные в смысле вычислительных затрат α-β и α-β-γ алгоритмы. Это позволяет сделать вывод о возрастании ошибок, связанных с неточностью применяемой в основе фильтра оценки состояния модели [5, 6].

Применение квазидетерминистских методов в задачах синтеза следящих систем также приводит к калмановским алгоритмам. В частности, такой результат получают на основе методов теории регуляризации или процедуры инвариантного погружения [2,3,7]. Несоответствие положенной в основу процедуры синтеза математической модели наблюдаемому процессу в данном случае приводит к ошибкам экстраполяции и является одной из причин расхождения фильтра и срыва вычислительной процедуры [2,4,6]. Попытки предотвращения такой ситуации связаны с использованием многомодельных алгоритмов или сложных моделей, характеризующихся большим числом подлежащих определению параметров [4]. Это приводит к возрастанию размерности задачи и препятствует реализации таких решений в следящих системах в реальном масштабе времени из-за ограниченной вычислительной мощности электронных вычислительных машин [1,9]. Таким образом, для повышения эффективности следящих систем необходимо решить задачу адаптации структуры модели исследуемой системы [11,14].

Основой решения задачи структурной адаптации с успехом может служить методология объединенного принципа максимума [10–12]. Этот подход приводит к модели динамической системы, которая удовлетворяет принципу Гамильтона-Остроградского [13]. Структура модели определяется из условия максимума функции обобщенной мощности с точностью до нелинейной синтезирующей функции, определяющей скорость диссипации и, соответственно, степень структурной адаптации. Практическая реализация полученных с применением такого подхода результатов в цифровых следящих системах ставит задачу выбора схемы конечномерной аппроксимации полученной модели [9], что связано с определением вида приближения синтезирующей функции и использованием общего решения однородного дифференциального уравнения.

Целью данной работы являлась разработка метода синтеза следящих систем в дискретном времени с адаптацией структуры модели на основе методологии объединенного принципа максимума.

Постановка задачи. Пусть динамика системы в дискретном времени задана с точностью до структур переходной матрицы $\Phi(k)\in R^{r\times r}$ и вектора интенсивности возмущений $G(k)\in R^{r}$ линейным разностным векторным уравнением [2,5,8]

$$x(k+1)=\Phi(k)x(k)+G(k)\eta(k), \tag{1}$$

где $\mathbf{x}(k)\in R^{r}$ —вектор состояния, $\eta(k)$ —возбуждающая функция, k —момент времени.

Уравнение наблюдений имеет вид

$$y(k)=Hx(k)+\xi(k), \tag{2}$$

где $H\in R^{1\times r}$ — матрица проекции пространства состояний на пространство наблюдений, $\xi(k)$ — белый гауссовский шум.

В пространстве наблюдений выбран целевой функционал

$$J=\frac{1}{2}\sum_{k=0}^{N}R_{\xi}^{-1}\left[y(k)-H\hat{x}(k)\right]^{2}, \tag{3}$$

где R_{ξ}^{-1} — параметр, который характеризует интенсивность помех в канале наблюдений, знак ^ означает оценку.

Требуется из условия минимума целевого функционала (3) найти оценки вектора состояния $\hat{x}(k) \in R^r$ для момента времени k, если он увеличивается [8, 11].

Синтез следящей системы на основе объединенного принципа максимума. Для решения поставленной экстремальной задачи (1)–(3) необходимо определить структуру матрицы переходов состояний $\Phi(k) \in R^{r\times r}$ и вектора интенсивности возмущений $G(k) \in R^r$ исходя из требований к синтезируемой следящей системе.

Математическое описание динамики системы основано на физических закономерностях и допущениях и поэтому является, как правило, приближенным, что приводит к неадекватности модели, которая трактуется как структурная неопределенность $\Phi(k) \in R^{r\times r}$. Например, так происходит когда в основу модели заложены лишь кинематические связи между параметрами движения [5,7].

Один из способов разрешения проблемы структурной неопределенности заключается в построении моделей с использованием утверждений, которые обеспечивают исчерпывающее описание динамики систем. За основу могут быть выбраны вариационные принципы [13]. В работе [11] с использованием принципа Гамильтона-Остроградского получена модель состояния в форме дифференциального уравнения второго порядка

$$\ddot{\hat{x}} = Q = \varepsilon \frac{-\left|\dot{\hat{x}}\right| \dot{\hat{x}}}{\left|\hat{x}\right|} + \zeta\left[y(t) - H(\hat{x}, t)\right], \qquad \hat{x}(t_0) = \hat{x}^0, \dot{\hat{x}}(t_0) = \dot{\hat{x}}^0, \tag{4}$$

где ε — параметр адаптации, определяющий долю регулярной составляющей приращения вектора состояния, $\zeta = \dfrac{1}{\lambda R_\xi}$ — параметр, определяющий вклад случайного процесса в наблюдаемое изменение состояния, $Q \in \bar{G}_Q$ — обобщенная сила, $\bar{G}_Q$ — замкнутое ограниченное множество.

Модель (4) получена на основе условия [10]

$$\Phi = \max_{Q \in \bar{G}_Q}\left[\lambda Q(x, \dot{x}) - R_\xi^{-1}\left[y(t) - H(\hat{x}, t)\right]\right]\dot{x}, \quad \lambda = const, \tag{5}$$

где λ — неопределенный множитель Лагранжа, откуда с точностью до синтезирующей функции $\mu\left(\hat{x}, \dot{\hat{x}}\right)$ [12]

$$\hat{Q} = \lambda^{-1}\left[\mu\left(\hat{x}, \dot{\hat{x}}\right)\dot{\hat{x}} + R_\xi^{-1}\left[y(t) - H(\hat{x}, t)\right]\right]. \tag{6}$$

Для получения конечномерной аппроксимации (4) в форме векторного разностного уравнения (1) запишем его как векторное дифференциальное уравнение первого порядка. Процедура расширения пространства состояний приводит к следующему результату

$$\dot{x} = f(x) + G\eta(t), \quad x(t_0) = x^0, \tag{7}$$

где $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$, $x_1 = \hat{x}, x_2 = \dot{\hat{x}},$ $f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ -\varepsilon \dfrac{|x_1| x_2}{|x_1|} \end{bmatrix} = A(x)x$ — вектор-функция системы для которой, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \beta \end{bmatrix}$ $G = \begin{bmatrix} 0 \\ \zeta \end{bmatrix}$,

$\eta(t)$ — центрированный относительно Hx случайный процесс с интенсивностью R_η ,. $\beta = -\varepsilon \dfrac{|x_2|}{|x_1|}$

Рассматривается широко распространенный случай [5], когда выполняется с достаточной степенью точности условие: $\beta = const$. Тогда в дискретном времени для решения уравнения (7) справедливо [5]

$$x(t + \Delta T) = \mathrm{e}^{A\Delta T} x(t) + \int_t^{t+\Delta T} \mathrm{e}^{A(t+\Delta T-\tau)} G\,\eta(\tau)\,\mathrm{d}\tau, \tag{8}$$

откуда

$$\Phi(k) = \mathrm{e}^{A\Delta T}, \quad G(k)\eta(k) = \int_{k\Delta T}^{(k+1)\Delta T} \mathrm{e}^{A((k+1)\Delta T-\tau)} G\,\eta(\tau)\mathrm{d}\tau, \tag{9}$$

где ΔT — фиксированный интервал дискретизации.

Вычисление матричной экспоненты приводит к матрице перехода состояний, которая определяется двумя параметрами

$$\Phi(\Delta T, \beta) = \mathrm{e}^{\mathrm{A}\Delta T} = \begin{bmatrix} 1 & \dfrac{\mathrm{e}^{\beta\Delta T}-1}{\beta} \\ 0 & \mathrm{e}^{\beta\Delta T} \end{bmatrix}, \tag{10}$$

а вектор интенсивности возмущений сверткой

$$\mathrm{G}(k)\eta(k) = \int\limits_{k\Delta T}^{(k+1)\Delta T} \begin{bmatrix} 1 & \dfrac{\mathrm{e}^{\beta}-1}{\beta} \\ 0 & \mathrm{e}^{\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \zeta \end{bmatrix} \eta(\tau)\mathrm{d}\tau = \int\limits_{k\Delta T}^{(k+1)\Delta T} \begin{bmatrix} n_1(\tau) \\ n_2(\tau) \end{bmatrix} \eta(\tau)\mathrm{d}\tau, \tag{11}$$

где $n_1(\tau) = \zeta \dfrac{\mathrm{e}^{\beta}-1}{\beta}$, $n_2(\tau) = \zeta \mathrm{e}^{\beta}$.

Решение полностью формализованной экстремальной задачи (1)–(3) с использованием дискретного варианта метода инвариантного погружения приводит к алгоритму калмановского типа [2–4, 8]

$$\begin{aligned}
&\hat{\mathrm{x}}(k+1|k) = \Phi(\Delta T, \beta)\,\hat{\mathrm{x}}(k|k), \\
&\hat{\mathrm{x}}(k|k) = \hat{\mathrm{x}}(k|k-1) + \mathrm{K}(k|k-1)[y(k) - \mathrm{H}\hat{\mathrm{x}}(k|k-1)], \\
&\mathrm{K}(k|k-1) = \mathrm{P}(k|k-1)\mathrm{H}^T\left[\mathrm{HP}(k|k-1)\mathrm{H}^T + R_{\xi}^2\right]^{-1}, \\
&\mathrm{P}(k|k-1) = \Phi(\Delta T, \beta)\mathrm{P}(k-1|k-1)\Phi^T(\Delta T, \beta) + \mathrm{V}(k), \\
&\mathrm{P}(k|k) = \mathrm{P}(k|k-1) - \mathrm{P}(k|k-1)\mathrm{H}^T\left[\mathrm{HP}(k|k-1)\mathrm{H}^T + R_{\xi}^2\right]^{-1}\mathrm{HP}(k|k-1),
\end{aligned} \tag{12}$$

где $\hat{x}(k+1|k)$ — оценка $x(k+1)$ по всем предыдущим измерениям, включая последнее k-е значение (предсказание на шаг), $\hat{x}(k|k)$ — оценка $\mathrm{x}(k)$ по всем предыдущим измерениям (фильтрация), $K(k|k-1)$ — коэффициент обратной связи, $P(k|k)$, $P(k|k-1)$ — соответственно ковариационные матрицы оценки и предсказания на шаг,

$$\mathbf{V} = \begin{vmatrix} \dfrac{\zeta^2 R_\eta}{\beta}\left(\dfrac{\mathrm{e}^{2\beta\Delta T}-1}{2\beta^2} + \dfrac{2 - 2\mathrm{e}^{\beta\Delta T}}{\beta^2} + \dfrac{\Delta T}{\beta}\right) & \dfrac{\zeta^2 R_\eta}{\beta}\left(\dfrac{\mathrm{e}^{2\beta\Delta T}-1}{2\beta} + \dfrac{1 - \mathrm{e}^{\beta\Delta T}}{\beta}\right) \\ \dfrac{\zeta^2 R_\eta}{\beta}\left(\dfrac{\mathrm{e}^{2\beta\Delta T}-1}{2\beta} + \dfrac{1 - \mathrm{e}^{\beta\Delta T}}{\beta}\right) & \dfrac{\zeta^2 R_\eta}{\beta}\left(\dfrac{\mathrm{e}^{2\beta\Delta T}-1}{2}\right) \end{vmatrix} \tag{13}$$

— ковариационная матрица вектора возмущений.

Исследование эффективности предлагаемого решения. Рассмотрим варианты построения следящих систем с использованием предлагаемой модели и традиционно используемых вариантов кинематических моделей для $x \in R^2$ и $x \in R^3$ [7]

$$x_1(k) = x_1(k-1) + x_2(k-1)\Delta\mathrm{T} + \frac{x_3(k-1)\Delta\mathrm{T}^2}{2} + \dots, \tag{14}$$

где $x_2 = \dot{x}$, $x_3 = \ddot{x}$ — соответственно скорость и ускорение.

При

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, H = |1 \quad 0|, \tag{15}$$

из (14) имеем [5]

$$\Phi = \begin{vmatrix} 1 & \Delta T \\ 0 & 1 \end{vmatrix}, \; G = \begin{vmatrix} \dfrac{\Delta T^2}{2} \\ \Delta T \end{vmatrix}, \tag{16}$$

откуда для вектора интенсивности возмущений

$$G(k)\eta(k) = \int\limits_{k\Delta T}^{(k+1)\Delta T} \begin{bmatrix} \dfrac{3\Delta T^2}{2} \\ \Delta T \end{bmatrix} \eta(\tau)\mathrm{d}\tau\,. \tag{17}$$

Его использование позволяет получить ковариационную матрицу возмущений

$$V=\begin{vmatrix}\dfrac{9R_\eta\Delta T^5}{20} & \dfrac{R_\eta\Delta T^4}{2}\\ \dfrac{R_\eta\Delta T^4}{2} & \dfrac{R_\eta\Delta T^3}{2}\end{vmatrix}. \qquad (18)$$

Пусть

$$x=\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\x_3\end{bmatrix}, H=\begin{vmatrix}1 & 0 & 0\end{vmatrix}, \qquad (19)$$

где ускорение описывается моделью формирующего фильтра в непрерывном времени [5]

$$\dot{x}_3=-\alpha\dot{x}_3+w, \qquad (20)$$

α — постоянная времени ускорения, w — возбуждающая функция. Тогда при выборе возбуждающей функции в виде белого шума уравнения движения записываются в форме векторного дифференциального уравнения первого порядка, откуда [5]

$$\Phi=\begin{vmatrix}1 & \Delta T & \dfrac{1}{\alpha^2}\left[-1+\alpha\Delta T+\exp[-\alpha\Delta T]\right]\\ 0 & 1 & \dfrac{1}{\alpha}\left[1-\exp[-\alpha\Delta T]\right]\\ 0 & 0 & \exp[-\alpha\Delta T]\end{vmatrix}. \qquad (21)$$

При фиксированном α и достаточно высокой частоте поступления измерительной информации, когда $\alpha\Delta T$ мало, (21) вырождается в матрицу Ньютона

$$\Phi=\begin{vmatrix}1 & \Delta \mathrm{T} & \dfrac{\Delta \mathrm{T}^2}{2}\\ 0 & 1 & \Delta \mathrm{T}\\ 0 & 0 & 1\end{vmatrix}, \qquad (22)$$

которая может быть получена из (14). Соответственно вектор интенсивности возмущений определяется выражением [5]

$$\mathrm{G}(k)w(k)=$$

$$=\int\limits_{k\Delta T}^{(k+1)\Delta T}\begin{bmatrix}1 & (k+1)\Delta T-\tau & \dfrac{1}{\alpha^2}\left[-1+\alpha((k+1)\Delta T-\tau)\right]+\exp\left[-\alpha((k+1)\Delta T-\tau)\right]\\ 0 & 1 & \dfrac{1}{\alpha}\left[1-\exp\left[-\alpha((k+1)\Delta T-\tau)\right]\right]\\ 0 & 0 & \exp\left[-\alpha((k+1)\Delta T-\tau)\right]\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0\\0\\1\end{bmatrix}w(\tau)\mathrm{d}\tau. \qquad (23)$$

Из (23) получены элементы ковариационной матрицы возбуждающей функции [5]

$$\begin{aligned}
\mathrm{V}_{11}&=\frac{2\alpha R_\eta}{2\alpha^5}\left[1-e^{-2\alpha\Delta T}+2\alpha\Delta T+2\alpha^2\Delta T^2-4\alpha\Delta Te^{-\alpha T}\right],\\
\mathrm{V}_{12}&=\frac{2\alpha R_\eta}{2\alpha^4}\left[e^{-2\alpha\Delta T}+1-e^{-\alpha\Delta T}+2\alpha\Delta Te^{-\alpha T}+2\alpha\Delta T+\alpha^2\Delta T^2\right],\\
\mathrm{V}_{13}&=\frac{2\alpha R_\eta}{2\alpha^3}\left[1-e^{-2\alpha\Delta T}+2\alpha Te^{-\alpha\Delta T}\right],\\
\mathrm{V}_{22}&=\frac{2\alpha R_\eta}{2\alpha^3}\left[4e^{-\alpha\Delta T}-3-e^{-2\alpha\Delta T}+2\alpha\Delta T\right],\\
\mathrm{V}_{23}&=\frac{2\alpha R_\eta}{2\alpha^2}\left[e^{-2\alpha\Delta T}+1-e^{-\alpha\Delta T}\right],\\
\mathrm{V}_{33}&=\frac{2\alpha R_\eta}{2\alpha}\left[1-e^{-2\alpha\Delta T}\right],\\
V_{21}&=V_{31}=V_{33}=0.
\end{aligned} \qquad (24)$$

Оценка эффективности предлагаемого решения проведена на основе сравнения результатов функционирования трех моделей (13), (18) и (24) [5,7].

Рассмотрен переходной режим функционирования в условиях шумов наблюдения, когда входное возмущение задано ступенчатой функцией. На рис. 1 представлена одна из реализаций переходного процесса. Здесь цифрами обозначено: 1 — переходной процесс новой следящей системы (12); 2 — переходной процесс фильтра Калмана с моделью для равномерного движения; 3 — переходной процесс фильтра Калмана с моделью ускорения Зингера (21); 4 — возмущение. Итоги 100 вычислительных экспериментов подтверждают, что переходной процесс (12) выгодно отличается меньшей колебательностью и временем сходимости от фильтров с (18) и (22).

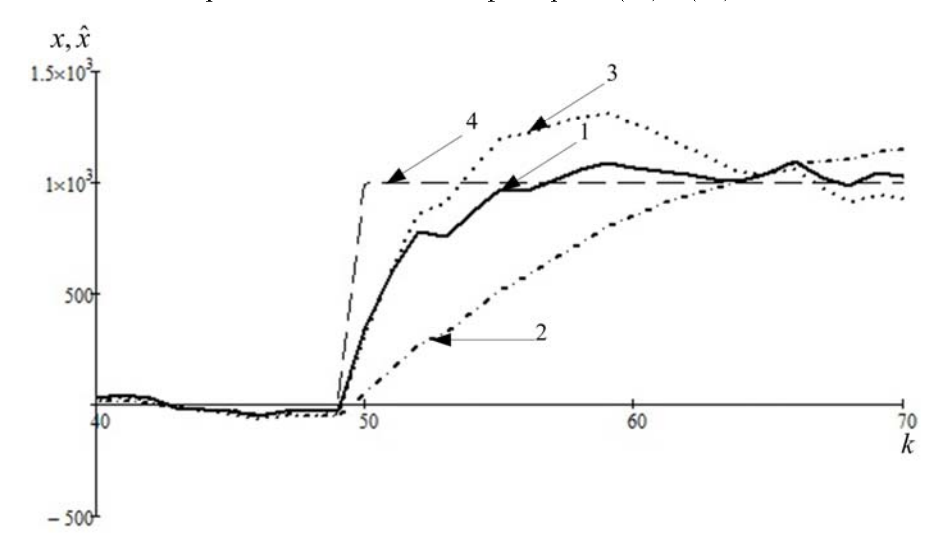


Рис. 1. Переходной процесс

Fig.1. Transient process

Анализ результатов математического моделирования позволяет сделать вывод о том, что преимущество нового решения (12) в переходном режиме достигается за счет большего коэффициента обратной связи. Это демонстрируется на рис. 2. Здесь сохранены ранее принятые обозначения.

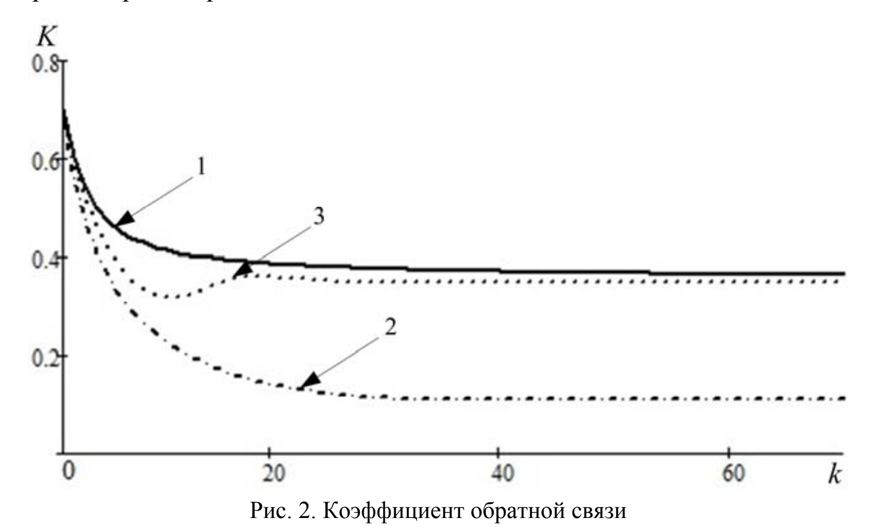


Рис. 2. Коэффициент обратной связи

Fig.2. Feedback parameter

Выводы. Разработан новый метод синтеза дискретных следящих систем на основе объединенного принципа максимума. Он обеспечивает структурную адаптацию к наблюдаемому изменению состояния за счет новой линейной динамической модели в дискретном времени. Это проявляется в высокой скорости сходимости получаемых на его основе оценок к действительным значениям по сравнению с оценками фильтров Калмана с кинематическими моделями изменения состояния [5].

Библиографический список

1. Руденко, Е. А. Оптимальные дискретные нелинейные фильтры порядка объекта и их гауссовские приближения / Е. А. Руденко // Автоматика и телемеханика. — 2010. — № 2. — С.159–178.
2. Итеративные регуляризированные алгоритмы обработки измерительной информации / А. А. Костоглотов [и др.] // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2010. — № 11. — С.3–9.
3. Костоглотов, А. А. Синтез алгоритма оценки параметров движения летательных аппаратов на основе метода скорейшего спуска / А. А. Костоглотов, А. А. Кузнецов // Автоматика и вычислительная техника. — 2004 — №4. — С.53–62.
4. Костоглотов, А. А. Субоптимальная оценка параметров динамических систем / А. А. Костоглотов, В. Н. Таран // Автоматика и телемеханика. — 1997. — № 4. — С.85–94.
5. Singer, R. A. Estimating Optimal Tracking Filter Performance for Manned Maneuvering Targets / R. A. Singer // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. — 1970. — AES-6. No 4. — P. 473–483.
6. Schooler, C. C. Optimal a-b Filters For Systems with Modeling Inaccuracies / C. C. Schooler // // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. — 1975. — AES-11. No 6. — P. 1300–1306.
7. Li, X. R., Jilkov, V. P. Survey of Maneuvering Target Tracking. Part I: Dynamic Models / X. R. Li, V. P. Jilkov // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. — 2003. — Vol. 39. No 4. — P. 1333–1364.
8. Sage, A. P. System Identification / A. P. Sage, J. L. Melsa. — New York and London: Academic Press, 1971. — 221 p.
9. Илюхин, И. В. Промышленные мехатронные электропневматические приводы / И. В. Илюхин, А. Н. Харченко, С. А. Арфикян // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2010. — № 8. — С.1184–1188.
10. Костоглотов, А. А. Объединенный принцип максимума в информационных технологиях анализа и синтеза / А. А. Костоглотов, А. И. Костоглотов, С. В. Лазаренко. — Ростов-на-Дону: РТИСТ (фил.) ГОУ ВПО "ЮРГУЭС", 2010. — 164 с.
11. Синтез фильтра сопровождения со структурной адаптацией на основе объединенного принципа максимума / А. А. Костоглотов [и др.] // Информационно-управляющие системы. — 2015. — № 4 (77). — С.2–9.
12. Синтез оптимального управления на основе объединенного принципа максимума / А. А. Костоглотов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2010. — №2. — С.31– 37.
13. Лурье, А. И. Аналитическая механика / А. И. Лурье. — Москва : ГИФМЛ, 1961. — 824 с.
14. Андрашитов, Д. С. Структурный синтез Лагранжевых систем автоматического управления с использованием первых интегралов движения / Д. С. Андрашитов [и др.] // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2015. — №12. — С.12–18.

References

1. Rudenko, E.A. Optimal'nye diskretnye nelineynye fil'try poryadka ob"ekta i ikh gaussovskie priblizheniya. [Optimal discrete nonlinear filters of the object's order and their Gaussian approximations.] Avtomatika i Telemekhanika, 2010, no. 2, pp. 159–178 (in Russian).
2. Kostoglotov, A.A., et al. Iterativnye regulyarizirovannye algoritmy obrabotki izmeritel'noy informatsii. [Iterative regularized processing algorithms of the measuring information.] Herald of Computer and Information Technologies, 2010, no. 11, pp. 3–9 (in Russian).
3. Kostoglotov, A.A., Kuznetsov, A.A. Sintez algoritma otsenki parametrov dvizheniya letatel'nykh apparatov na osnove metoda skoreyshego spuska. [Synthesis of estimator of flyer motion variables based on the steepest descent method.] Automatic Control and Computer Sciences, 2004, no. 4, pp. 53–62 (in Russian).
4. Kostoglotov, A.A., Taran, V.N. Suboptimal'naya otsenka parametrov dinamicheskikh sistem. [Suboptimal Parameter Estimation in Dynamic Systems.] Avtomatika i Telemekhanika, 1997, no. 4, pp.85–94 (in Russian).
5. Singer, R.A. Estimating Optimal Tracking Filter Performance for Manned Maneuvering Targets. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1970, AES-6, no. 4, pp. 473–483.
6. Schooler, C.C. Optimal a-b Filters For Systems with Modeling Inaccuracies. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1975, AES-11, no. 6, pp. 1300 – 1306.
7. Li, X. R., Jilkov, V. P. Survey of Maneuvering Target Tracking. Part I: Dynamic Models. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 1333 – 1364.
8. Sage, A.P., Melsa, J.L. System Identification. New York and London: Academic Press, 1971, 221 p.
9. Ilyukhin, I.V., Kharchenko, A.N., Arfikyan, S.A. Promyshlennye mekhatronnye elektropnevmaticheskie privody. [Industrial mechatronic electropneumatic drives.] Vestnik of DSTU, 2010, no. 8, pp. 1184–1188 (in Russian).

10. Kostoglotov, A.A., Kostoglotov, A.I., Lazarenko, S.V. Ob"edinennyy printsip maksimuma v informatsionnykh tekhnologiyakh analiza i sinteza. [Combined maximum principle in information technologies of analysis and synthesis.] Rostov-on-Don: RTIST (fil.) GOU VPO "YuRGUES", 2010, 164 p. (in Russian).

11. Kostoglotov, A.A., et al. Sintez fil'tra soprovozhdeniya so strukturnoy adaptatsiey na osnove ob"edinennogo printsipa maksimuma. [Synthesis of Filter Support with Structural Adaptation Based on Combined Maximum Principle.] Information and Control Systems, 2015, no. 4 (77), pp. 2–9 (in Russian).

12. Kostoglotov, A.A., et al. Sintez optimal'nogo upravleniya na osnove ob"edinennogo printsipa maksimuma. [Optimal control synthesis based on combined maximum principle.] University News. North-Caucasian region. Technical Sciences Series, 2010, no. 2, pp. 31–37 (in Russian).

13. Lurye, A.I. Analiticheskaya mekhanika. [Analytic Mechanics.] Moscow: GIFML, 1961, 824 p. (in Russian).

14. Andrashitov, D.S., et al. Strukturnyy sintez Lagranzhevykh sistem avtomaticheskogo upravleniya s ispol'zovaniem pervykh integralov dvizheniya. [Structural synthesis of Langrangian systems of automatic control with the use of first integrals of motion.] Information-measuring and Control Systems, 2015, no. 12, pp. 12–18 (in Russian).

Поступила в редакцию 25.07.2016
Сдана в редакцию 25.07.2016
Запланирована в номер 11.01.2017

Received 25.07.2016
Submitted 25.07.2016
Scheduled in the issue 11.01.2017

Об авторах:

Костоглотов Андрей Александрович, профессор кафедры «Кибербезопасность информационных систем» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),доктор технических наук, профессор, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4006-2436 , kostoglotov@icloud.com

Кузнецов Антон Александрович, докторант Военного учебно - научного центра военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (РФ, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54 «А») кандидат технических наук, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5960-9481 smithaa@yandex.ru

Лазаренко Сергей Валерьевич, докторант Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7533-2822, rh3311@mail.ru

Дерябкин Игорь Владимирович, старший научный сотрудник Ростовского государственного университета путей сообщения (РФ, 346500, г. Ростов-на-Дону, ул. Шевченко, д. 147), кандидат технических наук, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4716-1827, i.deryabkin@jint.biz

Лосев Виталий Александрович, аспирант Института сферы обслуживания и предпринимательства филиала Донского государственного технического университета (РФ, 346500, Ростовская обл., г. Шахты, ул. Шевченко, д. 147), ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4248-371X, aibolit_773@mail.ru

Authors:

Kostoglotov, Andrey A., professor of the Cybersecurity of IT Systems, Don State Technical University (RF, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1) Dr. Sci. (Eng.), professor, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4006-2436, kostoglotov@icloud.com

Kuznetsov, Anton A., postdoctoral student, Air-Force Scientific-Training Centre, Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin (RF, Voronezh, Starykh Bolshevikov St., 54 A), Cand. Sci. (Eng.), ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5960-9481, smithaa@yandex.ru

Lazarenko, Sergey V., postdoctoral student, Don State Technical University (RF, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1) Cand. Sci. (Eng.), ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7533-2822, rh3311@mail.ru

Deryabkin, Igor V., senior research scholar, Rostov State Transport University (RF, Rostov Region, Shakhty, Shevchenko St., 147), Cand. Sci. (Eng.), ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4716-1827, i.deryabkin@jint.biz

Losev, Vitaly A., postgraduate student, Institute of Service and Business (DSTU branch), (RF, Shakhty, Shevchenko St., 147), ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4248-371X, aibolit_773@mail.ru